

補助事業番号 2020M-179

補助事業名 2020年度 集束超音波治療の予測に向けた大規模錬成解析技術の実現  
補助事業

補助事業者名 宮崎大学 武居周

## 1 研究の概要

我が国の2020年の死因の第一位は、昨年と同様、悪性新生物(腫瘍)であり、高齢化社会の加速と共にその治療方法の高度化の重要性が高まる一方であることは、論を俟ちません。近年、電磁界を用いる癌温熱療法が非侵襲(または低侵襲)の治療方法として注目を集めていますが、超音波を利用する収束超音波温熱療法も電磁界のものと同様に有効な非侵襲治療方法として普及してきています。そこで、本研究では、収束超音波温熱療法の治療予測の高精度化に資する、大規模・高精度な超音波連成計算が可能な解析技術を構築しました。連成計算のコアとなる大規模非定常音響解析手法と、人体モデルの高精度化手法の実現により、収束超音波温熱療法の治療予測の高精度化に役立てます。

## 2 研究の目的と背景

本研究の目的を、収束超音波温熱療法の治療予測の高精度化に資する、大規模・高精度な超音波連成計算が可能な大規模非定常解析手法の実現と、人体数値モデルの高精度化手法の実現としています。これまで、代表者らによって開発された、領域分割法に基づく波動音響解析手法は、ファイルI/Oライブラリ、並列化に必要となる前処理を実施するドメインデコンポーザ、解析コードの整数型が32bit(int32)でした。まず、1億要素以上の超大規模数値モデルを扱うために64bit化する必要があります。これは単に、int64型に書き換えるだけでは実現せず、データの分割バイト数など、細部にわたり大幅な改修が必要となります。また、精度の高い治療予測のためには、CT/MRTによりボクセルデータとして作られる人体数値モデルそのものの高精度化の必要もあります。これらを実現するために、以下の内容により研究を進めました。

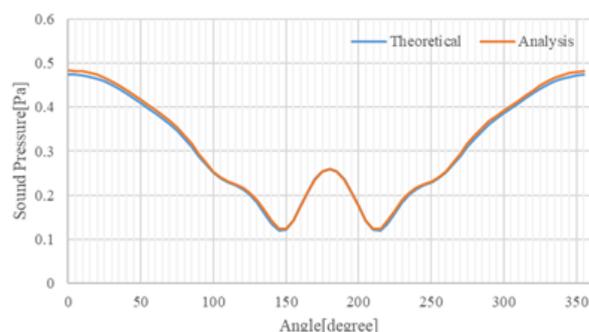
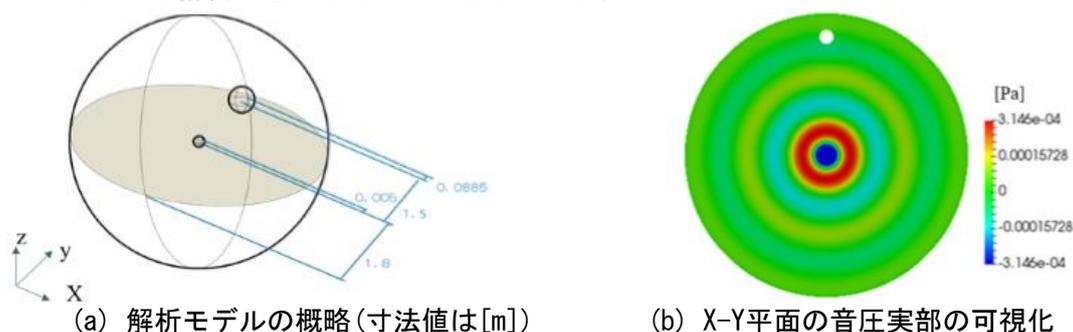
## 3 研究内容

### (1)大規模非定常音響解析手法の開発

本研究において開発する非定常音響解析システムに含まれる、(i) I/Oライブラリ、(ii) ドメイン・デコンポーザ、(iii) 音響解析ソルバのすべてにおいて用いるint32型をint64型に変更しました。また、32bitでは4byte単位の表現であるが、64bitでは8byte単位の表現であるため、ファイルの読み書きや、MPI通信部等のデータI/Oのbyte単位を変更しました。これらにより、1億～数100億の音響解析が可能となる、並列音響解析コードが実現しました。

開発したコードの精度検証、特に1億要素規模での検証は、人間の頭部を模した球体を用い、球表面の理論値に対する計算値の誤差評価を行いました。更に、HSTFの周波数振幅特性を求め、理論値に対する計算値の誤差評価を行いました。解析モデル概略を図1(a)に示

します。本解析モデルは、中心に位置する半径0.005[m]の球が一定の振動速度で呼吸振動しているとし、音源の球体の中心から1.5[m]に位置する半径0.0885[m]の人間の頭部とする球表面の表面の音圧を、非定常音響解析により得ます。解析モデルを四面体二次要素で分割し、要素数は94,725,317、節点数は126,235,104の大規模モデルとなります。要素の最大辺長は、解析周波数2,000[Hz]における波長の約1/15であり、非定常音響解析において波長に対して十分な精度に近似したモデルとなります。



(c) 音圧に関する理論解と数値解の比較

図1 超音波計算のための非定常大規模音響解析コードの精度評価結果

図1(b)に図1(a)のz座標0(灰色部)における、X-Y平面の音圧実部の可視化結果を示します。これより、中心の音源から球面上に音圧の伝播が確認でき、完全吸音の境界面からの反射もなく、人体頭部の曲面の解析においても正しく計算されていることが確認できます。

次に、観測側の球体のz座標0の、表面上に観測点Mとなる点を、観測角 $0 \sim 360 [^\circ]$ で、 $5 [^\circ]$  間隔にとります。各点における相対音圧の理論値と計算値の比較を図1(c)に示します。図4より、理論値と計算値は良好な一致を示しています。総観測点における理論値に対する計算値の平均誤差率は1.8[%]であり、本研究において開発した音響解析コードが、自由曲面を含む形状においても非常に高い精度で計算できることが確認できました。

## (2)高精度化人体モデル構築のためのメッシュスムージング手法の開発

本項目で述べますメッシュスムージング手法として導入するマーチングキューブ法は、

主にコンピュータグラフィックスで用いられる技術です。スカラーデータにより構成された3次元ボクセルデータを、ポリゴンデータに変換するアルゴリズムとなります。マーチングキューブ法では、まず、互いに隣接する8個のボクセルの組を考え、ボクセルの値がある閾値より高い場合は1（黒）を、高くない場合は0（白）を返します。0、1の組み合わせは全部で256通りありますが、対称性、反転を考えると、図2に示す15通りに絞られます。それぞれのパターンに対して三角形ポリゴン群を割り当て、ボクセルの角点を除去することで、90°角点を除去し異種材料境界で発生する超音波の音圧集中を防ぎます。本研究では、マーチングキューブ法を適用した形状を表現するため、四面体要素の他、六面体要素、プリズム要素、ピラミッド要素を用いてメッシュ作成を行います。

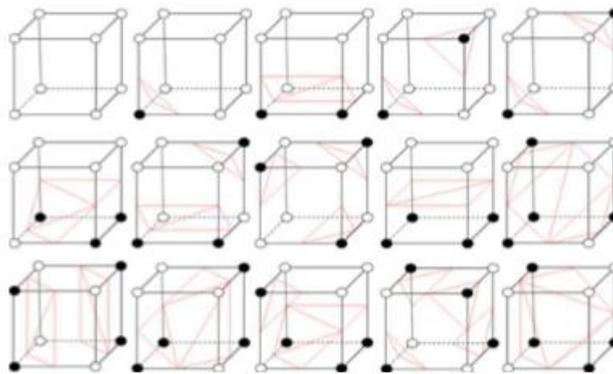
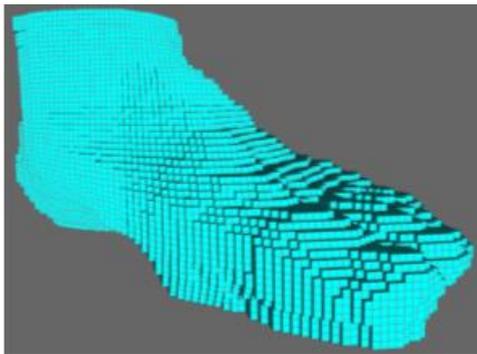
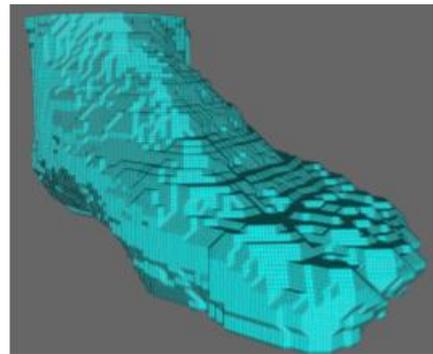


図2 マーチングキューブ法の適用パターン

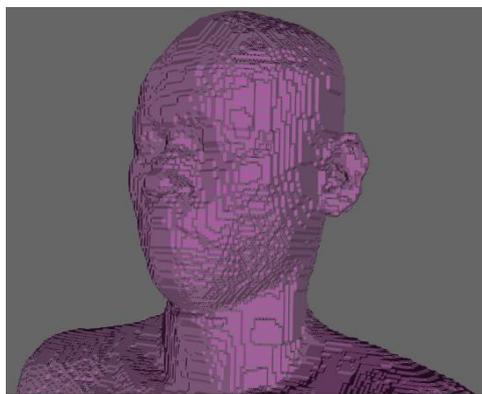
本メッシュスムージング・アルゴリズムを人体モデルに適用し、数値モデル高精度化に成功しました（図3）。図3(a)が可能性検証のための足首部分のボクセルデータ、図3(b)がその足首部分のスムージング結果、図3(c)が全身のスムージング結果（図は、胸部より上をクローズアップしたもの）です。スムージングした全身モデルの数値解析を実施し、計算に成功したことを、確認しました。今後、計算量・メモリ使用量など詳細な検討を繰り返し行い、実用化に向けた開発を推進します。



(a) 人体ボクセルデータ（足首）



(b) スムージング済み足首モデル



(c) 全身のスムージング結果（胸部より上をクローズアップしたもの）

図3 マーチングキューブ法に基づくメッシュスムージングによる高精度化人体モデル

#### 4 本研究が実社会にどう活かされるか—展望

我が国の癌治療方法の高度化の重要性が高まる一方であることは、明白です。近年、電磁界を用いる癌温熱療法が非侵襲(または低侵襲)の治療方法として注目を集めていますが、超音波を利用する収束超音波温熱療法も電磁界のものと同様に有効な非侵襲治療方法として普及しており、これを用いた温熱療法の治療予測の高精度化に貢献致します。また、計算科学研究のトピックとして日本の科学技術や自動車に搭載する超音波センサーの開発技術の高度化等、ものづくりを支える高精度数値シミュレーション技術として継続的な開発が、望まれています。

#### 5 教歴・研究歴の流れにおける今回研究の位置づけ

代表者らは、長年、高周波電磁界解析手法の開発とその工学的利用技術の研究に携わってきました。高周波電磁界は電磁界の波動現象であり、近年、その技術移転により波動音響解析手法の研究を推進してまいりました。この度、数億要素規模の大規模解析が必要となり、それに向けたコード全体の改修ならびに数値モデルの高精度化手法により、大規模高精度の非定常音響解析の数値例を示すことができました。他方、代表者は現在、文部科学省 高性能汎用計算機高度利用事業費補助金・「富岳」成果創出加速プログラム|クリーンエネルギー「富岳」プロジェクト「スーパーシミュレーションと AI を連携活用した実機クリーンエネルギーシステムのデジタルツイ

ンの構築と活用」(代表: 東京大学 吉村忍教授)に分担者として参画しています。ここでは、スーパーコンピュータ「富岳」上で、本事業で扱った音響解析の並列計算ソルバとなっている領域分解法アルゴリズムのチューニングを実施しており、並列解析コードのソルバ部分のHPC環境でのコード実用性を高めています。これにより、計算時間の削減検討が期待できます。また、波形の追従性がより高い形状関数の導入等により、更に高い周波数帯域の計算を実現するために、現在研究開発を進めております。また、今回開発しましたメッシュスムージング手法は、代表者が主宰する研究室に所属する大学院生および学部生の研究テーマの一部にもなっており、研究室での教育活動の一環として研究開発されたものでもあります。

## 6 本研究にかかわる知財・発表論文等

### 6-1. 査読付きジャーナル論文

- 1) A. Takei, M. Sakamoto, "Parallel Full-Wave Electromagnetic Field Analysis Using Anatomical Human Body Models," Journal of Advances in Artificial Life Robotics, Vol. 1, No. 1, pp.26-33 (2020).
- 2) M. Sakamoto, T. Ishizu, K. Sakoma, T. Shinoda, A. Takei, T. Ito, "A Fundamental Study on Hidden Surface Removal for Interactions between User's Bare Hands and Virtual Objects in Augmented Reality," Journal of Advances in Artificial Life Robotics, Vol. 1, No. 1, pp.21-25 (2020).
- 3) M. Sakamoto, T. Shinoda, K. Sakoma, T. Ishizu, A. Takei, T. Ito, "Interactive Projection Mapping using Human Detection by Machine Learning," Journal of Advances in Artificial Life Robotics, Vol. 1, No. 1, pp.85-89 (2020).
- 4) M. Sakamoto, K. Sakoma, T. Ishizu, T. Shinoda, A. Takei, T. Ito, "Basic Study on Motion Control of CG Characters by Electroencephalography (EEG) analysis," Journal of Advances in Artificial Life Robotics, Vol. 1, No. 1, pp.152-157 (2020).
- 5) M. Noumura, Y. Nakamura, H. Tarao, A. Takei, "Contact Current Density Analysis Inside Human Body in Low-Frequency Band Using Geometric Multi-Grid Solve," IEICE Transactions on Electronics, Vol. E103-C, No.11, pp.588-596 (2020).
- 6) 工藤彰洋, 下川原綾汰, 武居周, "種々の移動速度における移動音停止方位の定位精度", 日本音響学会誌, Vol. 75, No. 10, pp.547-553 (2020).
- 7) 武居周, 工藤彰洋, "並列有限要素法に基づく1億自由度超の波動音響解析", 日本シミュレーション学会論文誌, Vol. 12, No. 2, pp.76-84 (2020).
- 8) H. Tarao, M. Akutagawa, T. Emoto, A. Takei, H. Yumoto, T. Tominaga, T. Ikehara, Y. Kinouchi, "Evaluation of Temperature Increase From Joule Heat in Numerical Tooth Model by Applying 500 kHz Current for Apical Periodontitis Treatment —Effect of Applied Voltage and Tooth Conductivity," Bioelectromagnetics Vol. 42, pp.224-237 (2021).

## 6-2. 査読付き国際会議論文

- 1) M. Nomura, Y. Nakamura, H. Tarao, A. Takei, "Improvement of the Accuracy for the Electric Field Analysis by Contact Currents inside a Human Body Using the Marching Cubes Algorithm in a Low Frequency Domains," Proceedings of IEEE CEFC2020, Pisa, Italy, Apr. 19-22 (2020).

## 6-3. 査読なし国内会議

- 1) 武居周, 野村政宗, "数値人体モデルにおける階段近似誤差改善に向けたマーチングキューブ法に基づくメッシュスムージング," 第 29 回 MAGDA コンファレンス in 大津 (2020).
- 2) 武居周, "オープンソース・ソフトウェア: ADVENTURE\_FullWave の開発," 電子情報通信学会エレクトロニクスソサエティ, エレクトロニクスシミュレーション研究会, EST 研 R2 第 3 回, (1)EST, 2020.  
**【電子情報通信学会 2020 年度エレクトロニクスシミュレーション研究専門委員会 優秀論文発表賞(一般部門)受賞】**
- 3) 野村政宗, 武居周, "数値人体モデルにおける階段近似誤差緩和のためのマーチングキューブ法を応用したメッシュスムージング," 電子情報通信学会エレクトロニクスソサエティ, エレクトロニクスシミュレーション研究会, EST 研 R2 第 3 回, (1)EST (2020).
- 4) 工藤彰洋, 牧下涼亮, 武居周, "移動音の方向を知覚するために必要な移動角度の推定," 日本音響学会 2020 年秋季研究発表会 (2020).
- 5) 野村政宗, 武居周, "マーチングキューブ法を応用したメッシュスムージングによる人体内高精度電界解析," 第 33 回「電磁力関連のダイナミクス」シンポジウム (SEAD33) (2021).
- 6) 武居周, 野村政宗, "非構造幾何マルチグリッド法に基づく高精度人体内電界計算," 第 26 回計算工学講演会論文集, Vol.26, (2021).
- 7) 杉本振一郎, 武居周, 荻野正雄, "数値人体モデルの電磁界-熱伝導連成解析の検討," 第 26 回計算工学講演会論文集, Vol.26, (2021).
- 8) 後藤聡太, 武居周, 金子栄樹, 吉村忍, "ADVENTURE\_Thermal コードと非統計学的なアプローチによる不確かさ定量化," 第 26 回計算工学講演会論文集, Vol.26, (2021).

## 7 補助事業に係る成果物

### (1)補助事業により作成したもの

非定常並列音響解析コード: ADVENTURE\_Sound

東京大学ADVENTURE Project HP (<https://adventure.sys.t.u-tokyo.ac.jp/>)上でバージョンアップ版を公開予定です。

### (2)(1)以外で当事業において作成したもの

メッシュスムージング手法

本開発は、Goethe University Frankfurt am MainのG-CSC(<https://gcsc.uni-frankfurt.de/>)との共同研究の一環により、有限要素解析フレームワーク: UG4(<https://gcsc.uni-frankfurt.de/simulation-and-modelling/ug4>)をベースとして進めています。

## 8 事業内容についての問い合わせ先

所属機関名: 宮崎大学工学部 (ミヤザキダイガクコウガクブ)

住 所: 〒889-2192

宮崎県宮崎市学園木花台西1-1

担 当 者: 准教授 武居周 (タケイアマネ)

担 当 部 署: 工学科電気電子プログラム (コウガッカデンキデンシプログラム)

E - m a i l: [takei@cc.miyazaki-u.ac.jp](mailto:takei@cc.miyazaki-u.ac.jp)

U R L: <http://hamayu.emi.miyazaki-u.ac.jp/index.html>